

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2020～2021

課題番号：20K21155

研究課題名(和文)メガ光渦形成機構の解明と実証

研究課題名(英文)Elucidation and demonstration of mega optical vortex formation mechanism

研究代表者

中田 芳樹(Nakata, Yoshiki)

大阪大学・レーザー科学研究所・准教授

研究者番号：70291523

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,600,000円

研究成果の概要(和文)：光渦は電磁波の一形態であり、光強度が0となる特異点を中心に円環状の光強度分布と螺旋状の波面を持つ。本研究では、これまでに開発した干渉条件による光強度分布パターンの制御法を発展させ、複数光渦が自動的に精密配列した新しい光の形態「メガ光渦」の存在を実証することである。本助成の期間中に下記の成果を得た。

1. メガ光渦の2Dシミュレーターの作成とパラメーターサーベイ解析、3D化、2. 前記シミュレーターを用いた光強度分布の時間分解解析による螺旋波面の証明、3. CW, ナノ秒パルスレーザーを用いたメガ光渦生成装置の構築、4. メガ光渦の発生と観察
これらの結果から、メガ光渦の形成方法を確立し、その存在を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2Dシミュレーターの作成とパラメーターサーベイ解析を進めた結果、光渦と同様に光強度が0となる特異点を持つ円環状光パターンの周期構造が形成される条件を発見した。これを発展させ実証したのが本課題である。さらに、各円環状光パターンが光渦と同じ螺旋波面を持つ事を初めて明らかにした。これは新しい光の形態の発見である。

光渦の応用は2014年にノーベル化学賞を受賞したSTED顕微鏡にとどまらず光通信帯域増大、光物性制御、非線形光学、物質操作、加工応用などに関する提案や基礎研究が進められており、カイラルフォトニクス分野に「メガ光渦」が及ぼす革新性は非常に大きいと思われる。

研究成果の概要(英文)：A light vortex is a form of electromagnetic wave with a circular light intensity distribution and spiral wavefronts centred on a singularity point where the light intensity is zero. The aim of this research is to develop demonstrate the existence of a new form of light, the 'mega light vortex', in which multiple light vortices are automatically and precisely aligned. The following results were achieved during the period of this grant.

1. creation of a 2D simulator of the mega optical vortex, parameter survey analysis and 3D modelling; 2. proof of the spiral wavefront by time-resolved analysis of the light intensity distribution using the aforementioned simulator; 3. construction of a mega optical vortex generator using CW and nanosecond pulse lasers; 4. generation and observation of mega optical vortices. From these results, a method for the formation of mega optical vortices was established and their existence was demonstrated.

研究分野：レーザー工学

キーワード：光渦 周期構造 干渉パターン 軌道角運動量

1. 研究開始当初の背景

「光渦」は電磁波の一形態であり [1]、光強度が 0 となる特異点を中心に円環状の光強度分布と螺旋状の波面を持つ。光渦を用いた STED 超解像顕微鏡が 2014 年にノーベル化学賞を受賞したことから一躍脚光を浴び [2]、現在では軌道角運動量多重光通信 [3]やカイラル構造形成 [4]など多方面に応用されている。

一方中田は、干渉パターンの制御と加工応用に関する研究を 2001 年に開始した。6 ビーム干渉パターン形成時はスポットが三角格子状に自動配列し(図 1(a))、またビーム間の位相差や強度比を制御することでパターンをデザイン出来る事を見いだした [5,6]。さらにパラメータ探索を進めた結果、光渦と同様に光強度が 0 となる特異点を持つ円環状パターンの周期構造が形成される条件を発見し(図 1(d))、これをメガ光渦と名付けた。この光が一般的な光渦と同様の構造と機能を持つ場合、上記の応用の超並列化やマイクロな現象のマクロ化が可能となり、カイラルフォトニクス分野に革新的な発展をもたらすことが期待できる。

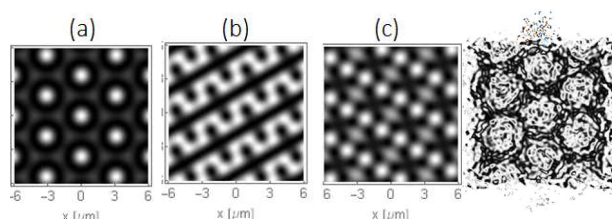


図 1 6 ビーム干渉パターン制御の例

左図は再提出時に差し替え予定

2. 研究の目的

従来の光渦とメガ光渦が同じ特徴を備えているかが、上記の応用の鍵となる。干渉パターンシミュレーターの構築と改良によるメガ光渦の検証、また従来の光渦と比較を行う。これらのシミュレーション結果を基に、実証実験を行う。一連の研究を通じて新しい光の形態であるメガ光渦研究分野の萌芽とする。これを達成することで新しい形態を持つ光源を開発し、フォトニクス分野の革新的な発展を目指す。

3. 研究の方法

- (1) これまでに開発した2D光強度分布シミュレーターの入力部を改良し、メガ光渦形成条件を
広範囲でサーベイする。
- (2) 2D光強度分布シミュレーターを改良し、時間分解解析を行うことで螺旋波面の存在を確認
する。
- (3) 3D光強度分布シミュレーターを開発し、光強度分布の3D解析を行う。
- (4) CWおよびナノ秒パルスレーザーを光源としたメガ光渦生成機構を構築し、実証実験を行
う。

4. 研究成果

- (1) 2D光強度分布シミュレーターを用いたメガ光渦形成条件の探索

2D 干渉パターンシミュレーションコードを改良し、エクセルファイルを利用したパラメータ一入力を行うことで広範囲にわたるパラメータサーベイを行った ($E_n = 1.0, 0.5, 0.0, \varphi_n = [0, 2\pi], n = 1 \sim 6$)。その結果、円環状の光パターンが三角格子配列するメガ光渦が形成形成されることを見いだした。図 2 左は一般的な 6 ビーム干渉パターン、右はメガ光渦である($\lambda_n = 532$ nm, $\theta_n = 21^\circ$)。円環状光パターン中心の光強度は 0 であり、特異点になっている。

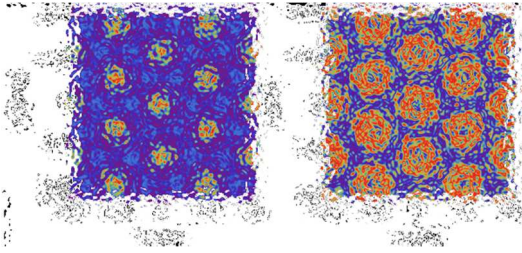


図2 6ビーム干渉パターンのシミュレーション結果

(2) シミュレーションによる螺旋波面の存在の確認

上記のシミュレーションコードにおいて時間積分範囲を 2π より十分短い時間に設定出来るように改良し、これを用いて時間分解解析を行った。図3に光強度分布の時間分解解析結果を示す。図より、光強度がゼロである特異点を中心に二つのスポットが周回する事を見出した。これは一般的な光渦と全く同じ挙動であり、軌道角運動量が $l = 1$ に相当する。以上から、螺旋波面の存在を証明した。

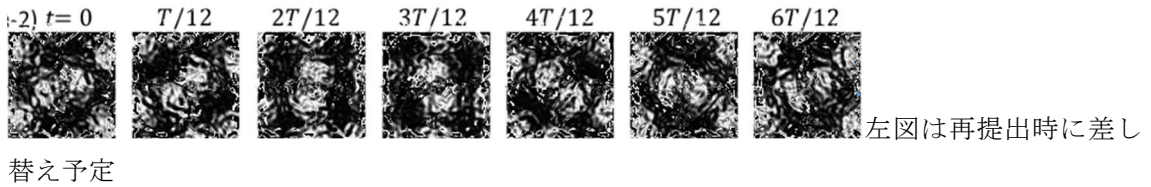


図3 メガ光渦の光強度分布時間分解解析結果

(3) 3D光強度分布解析

2D干渉パターンシミュレーションコードを改造し、3D表示化を行った。図4より、メガ光渦における特異点は z 軸と平行な直線形状である事が分かった。よって、円環状光パターンのサイズは z 座標によらず一定である。

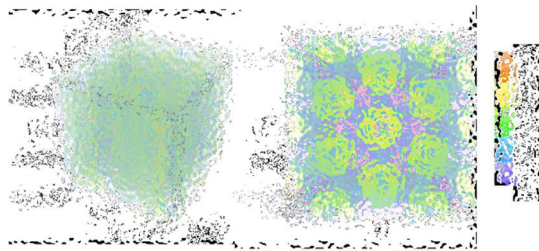


図4 メガ光渦の3D形状シミュレーション結果 (左: 鳥瞰図、右: 上面図)

(4) メガ光渦生成機構の実証実験

波長 532nm の CW モード LD を用い、メガ光渦生成装置を構築した。ビーム間の位相差を制御する場合、厚さ分布を持つガラスを 6 ビームが通過する。図5左はスポットが三角格子配列する。一方図5右は、円環状のパターンが形成された。干渉角度は $\theta_n = 0.72^\circ$ パターンの周期は $\Lambda = 48.8\text{mm}$ であり、シミュレーション結果とも一致した。以上より、メガ光渦の実証実験に成功した。また、ナノ秒パルスレーザーである Nd:YAG レーザーの SHG (波長 532nm) を用いた実験においても全く同じ結果が得られており、ピコ秒さらにはフェムト秒レーザーなどハイパワーレーザーへの応用の可能性が示された。

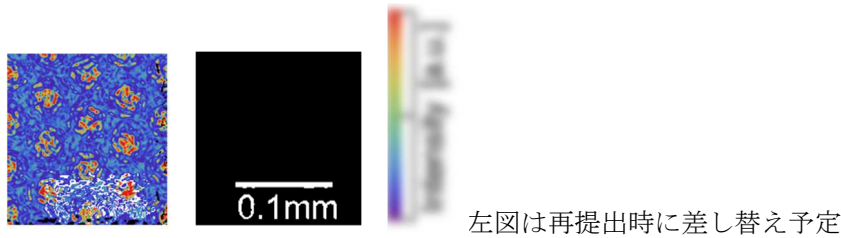


図5 光強度分布の測定結果

図6はメガ光渦と平面参照波を干渉させた場合を表し、上段がシミュレーション結果、下段が測定結果である。三日月状の Unit structure が同じ向きで三角格子状に配列しており、また実験結果とシミュレーション結果が良く一致した。平面波との干渉で三日月パターンが同じ向きを向いていることから、配列した円環状の光の波面が全て同位相である事を示している。また、カメラの z 軸方向に沿ってプラス方向に動かすと、三日月の構造が同じ向きを向いたまま回転する。このことから、 z 方向に対して同位相を保った光渦の配列が形成されている事が判明した。

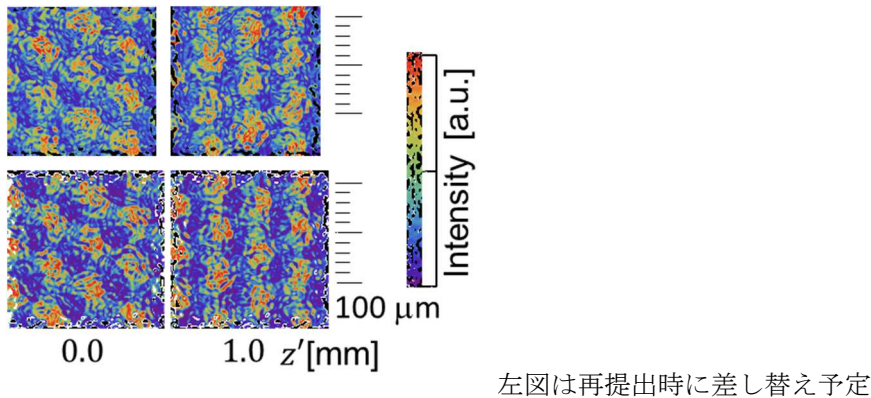


図6 メガ光渦と平面参照波の干渉（上段：シミュレーション結果、下段：測定結果）。左右はカメラの z 軸方向に沿った移動測定結果を表す。

<引用文献>

1. L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, and J. P. Woerdman, "Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes," *Phys. Rev. A - At. Mol. Opt. Phys.* **45**, 8185-8189 (1992).
2. K. I. Willig, S. O. Rizzoli, V. Westphal, R. Jahn, and S. W. Hell, "STED microscopy reveals that synaptotagmin remains clustered after synaptic vesicle exocytosis.," *Nature* **440**, 935-939 (2006).
3. J. Wang, J.-Y. Yang, I. M. Fazal, N. Ahmed, Y. Yan, H. Huang, Y. Ren, Y. Yue, S. Dolinar, M. Tur, and A. E. Willner, "Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing," *Nat. Photonics* **6**, 488-496 (2012).
4. K. Toyoda, K. Miyamoto, N. Aoki, R. Morita, and T. Omatsu, "Using optical vortex to control the chirality of twisted metal nanostructures," *Nano Lett.* **12**, 3645-3649 (2012).
5. Y. Nakata, M. Yoshida, and N. Miyanaga, "Parallel fabrication of spiral

- surface structures by interference pattern of circularly polarized beams," Sci. Rep. **8**, 13448 (2018).
6. Y. Nakata, K. Murakawa, K. Sonoda, K. Momoo, and N. Miyanaga, "Design of interference using coherent beams configured as a six-sided pyramid," Appl. Opt. **51**, 5004 (2012).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Nakata Yoshiaki, Miyanaga Noriaki, Osawa Kazuhito	4. 巻 126
2. 論文標題 Numerical simulation of an adaptive beam-shaping technique using a phase grating overlapped via a spatial light modulator for precision square?flat-top beam	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics A	6. 最初と最後の頁 126-1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00339-020-03496-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nakata Yoshiaki, Hayashi Eiki, Tsubakimoto Koji, Miyanaga Noriaki, Narazaki Aiko, Shoji Tatsuya, Tsuboi Yasuyuki	4. 巻 2
2. 論文標題 Nanodot array deposition via single shot laser interference pattern using laser-induced forward transfer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Extreme Manufacturing	6. 最初と最後の頁 025101 ~ 025101
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/2631-7990/ab88bf	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 中田 芳樹	4. 巻 58
2. 論文標題 光のマクロとマイクロ構造制御及びナノ加工応用（特集 レーザ加工とその応用）	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 光技術コンタクト	6. 最初と最後の頁 11-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 杉岡 幸次、平等 拓範、田所 譲、中田 芳樹、奈良崎 愛子、東野律子、谷田貝 豊彦、戒能 俊邦、上山 智、田邊 孝純、磯野 秀樹、川内 聡子、巻田 修一、平沢 壮、松浦 祐司、藤田 克昌、小川 恵美悠、川内 聡子、浜岡 隆文、Mark Gitin、Iftah Ries、Henrik Akesson	4. 巻 -
2. 論文標題 Photonics West 2020 報告書	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 オプトロニクス社	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshiki Nakata, Yuto Hirakawa, Tsubasa Morizuka, Yuki Kosaka, Noriaki Miyanaga, Kazuhito Osawa	4. 巻 15
2. 論文標題 Improved Efficiency of an Adaptive Beam-Shaping Technique Based on Phase Gratings and Spatial Frequency Filtering	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Laser Micro/Nanoengineering	6. 最初と最後の頁 232-235
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2961/jlmn.2020.03.2013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nakata Yoshiki, Tsubakimoto Koji, Miyanaga Noriaki, Narazaki Aiko, Shoji Tatsuya, Tsuboi Yasuyuki	4. 巻 11
2. 論文標題 Laser-Induced Transfer of Noble Metal Nanodots with Femtosecond Laser-Interference Processing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanomaterials	6. 最初と最後の頁 305 ~ 305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/nano11020305	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 中田芳樹, 白神宏之
2. 発表標題 超短パルスレーザーを用いた新奇ナノ周期構造の形成
3. 学会等名 電子材料研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Nakata, Y. Hirakawa, T. Aoyama, Y. Kosaka, K. Osawa
2. 発表標題 Extremely flattop polygon beam extraction from a Gaussian beam by using a virtual phase grating
3. 学会等名 2nd International Workshop on Frontiers in Lasers and Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 勝瀬 橋, 吉田英次, 椿本孝治, 中田芳樹
2. 発表標題 任意時系列制御高平均出力フェムト秒パルスレーザーの開発と加工特性
3. 学会等名 レーザー学会第553回研究会 「高機能固体レーザーとその応用」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshiki Nakata
2. 発表標題 Beam shaping to extremely flattop polygon by using a virtual phase grating
3. 学会等名 2 nd International Summit on OPTICS, PHOTONICS AND LASER TECHNOLOGIES (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平川裕人, 森塚 翼, 小坂悠起, 椿本孝治, 白神宏之, 中田芳樹
2. 発表標題 位相グレーティングと空間周波数フィルタリングを用いた超高精度ビーム整形
3. 学会等名 第551回 光・量子デバイス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小坂 悠起, 平川 裕人, 森塚 翼, 椿本 孝治, 白神 宏之, 宮永 憲明, 中田 芳樹
2. 発表標題 円偏光干渉パターンを用いたカイラル構造の多点同時形成
3. 学会等名 第68回応用物理学会春期学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshiki Nakata, Eiki Hayashi, Koji Tsubakimoto, Hiroyuki Shiraga, Aiko Narazaki, Tatsuya Shoji, Kenta Ushiro, Yasuyuki Tsuboi
2. 発表標題 Single shot deposition of nanodot array by laser-induced forward transfer using interference pattern
3. 学会等名 SPIE Laser-based Micro- and Nanoprocessing XV (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 位相グレーティングを用いたビーム整形における空間周波数フィルタリングの最適化
2. 発表標題 中田 芳樹, 平川 裕人, 森塚 翼, 小坂 悠起, 宮永 憲明, 大澤 一仁
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第41回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshiki Nakata
2. 発表標題 Parallel deposition of nanodots by laser-induced forward transfer technique which uses interference pattern
3. 学会等名 39th Int. Cong. Appl. Las. Elec. (ICALEO 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Nakata, E. Hayashi, K. Tsubakimoto, H. Shiraga, N. Saito, A. Narazaki, T. Shoji, K. Ushiro, Y. Tsuboi
2. 発表標題 Nanodot array deposition via laser interference pattern using laser-induced forward transfer
3. 学会等名 Ultrafastlight 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Nakata, T. Aoyama, Y. Kosaka, N. Miyanaga, K. Osawa
2. 発表標題 Universal beam shaping technique for area processing of nanostructures in lattice II
3. 学会等名 Laser Precision Microfabrication (LPM) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Kosaka, Yoshiki Nakata, Noriaki Miyanaga
2. 発表標題 Precision beam shaping technique for interference laser processing and fabrication of chiral structure in lattice,
3. 学会等名 SPIE Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM-XXV)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中田 芳樹, 宮永 憲明, 大澤 一仁
2. 発表標題 アダプティブ回折格子と空間周波数フィルタリングを用いたビーム整形技術の高精度化
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第40回年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

researchmap 中田芳樹 https://researchmap.jp/Y_Nakata 大阪大学レーザー科学研究所PLPグループ https://www.ile.osaka-u.ac.jp/research/lcc/
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------